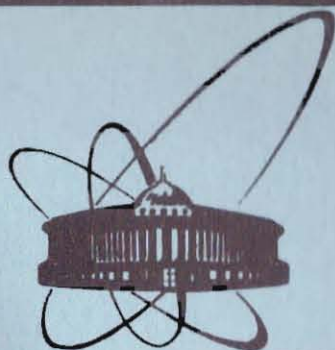


84-538



ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

P13-84-538

В.Д.Ананьев, В.А.Архипов, А.И.Бабаев, Ю.М.Булкин,
Б.Н.Бунин, В.С.Дмитриев, Н.А.Доллежалъ,
Л.В.Едунов, А.Д.Жиринов, В.Л.Ломидзе, В.И.Лушиков,
Ю.И.Митяев, Ю.М.Останевич, Ю.Н.Пепельшев,
В.С.Смирнов, И.М.Франк, Н.А.Хрястов,
Ю.М.Черкашов, Е.П.Шабалин, Ю.С.Язвицкий

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ПУСК РЕАКТОРА ИБР-2
И ПЕРВЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
НА ЕГО ПУЧКАХ

Направлено в журнал "Атомная энергия"

1984

Мощный импульсный источник нейтронов периодического действия реактор ИБР-2^{1/1} построен в Лаборатории нейтронной физики Объединенного института ядерных исследований в Дубне. Реактор предназначен для исследований по тематике Лаборатории: ядерная физика, физика конденсированных сред, молекулярная биология, физика элементарных частиц /фундаментальные свойства нейтрона/, а также для решения различного рода прикладных задач с помощью нейтронов.

Реакторы типа ИБР в Лаборатории нейтронной физики имеют длительную историю. Хорошо известно, что проведение современных научных исследований на реакторах требует высокой плотности нейтронных потоков. Поэтому не случайно из большого числа исследовательских реакторов выделяется группа так называемых высокопоточных атомных реакторов с максимальным потоком тепловых нейтронов $\sim 10^{15}$ нейтр./см²с /в СССР это реакторы СМ-2 и строящийся ПИК, в США - ВНFR, во Франции - НFR-ILL/. Эти реакторы имеют большую тепловую мощность 50-100 МВт при максимально допустимой удельной мощности. По многим техническим и экономическим причинам трудно рассчитывать на существенное повышение плотности потока стационарных реакторов. Однако для широкого класса исследований дальнейшее продвижение возможно при использовании импульсных источников периодического действия в сочетании с методом времени пролета. Первый реактор такого рода, имевший первоначально малую мощность, ИБР-1, был создан в Дубне по инициативе Д.И.Блохинцева. В дальнейшем он был реконструирован в ИБР-30, который успешно работает до сих пор. По своим параметрам и конструкции реактор ИБР-2 значительно отличается от своего предшественника ИБР-30.

Опыт работы показал, что на установке такого типа могут плодотворно решаться задачи, считавшиеся традиционными для стационарных реакторов. Таковы, например, нейтронные дифракционные исследования и применения метода малоуглового рассеяния. Тем более это относится к исследованиям упругого и неупругого рассеяния медленных нейтронов и нейтронным спектроскопическим исследованиям ядер. При этом использование импульсного реактора на быстрых нейтронах в сочетании с методом времени пролета значительно расширяет диапазон доступной для эксперимента области медленных нейтронов.

Опыт работы реактора ИБР показал, что следует сопоставлять импульсный поток такого реактора со стационарным в обычном реакторе. При их равенстве производительность экспериментальной аппаратуры на выведенных из реактора пучках оказывается пример-

но одинаковой. Так, ИБР-30 при средней мощности 20 кВт по своим возможностям эквивалентен исследовательским реакторам мегаваттной мощности. Понимание этого было заложено в проектировании реактора ИБР-2. При средней мощности несколько мегаватт импульсный поток должен достигать 10^{16} нейтр./см²с, т.е. существенно превосходить достижимое в стационарных реакторах. При этом малая по сравнению с высокопоточными реакторами средняя мощность устраняет многие технологические трудности и прежде всего - быстрое выгорание ядерного горючего.

Опыт работы реакторов ИБР привел к широкому пониманию преимуществ импульсных источников не только для нейтронной спектроскопии ядер, но и для физики конденсированных сред. Отсюда возникновение ряда проектов мощных импульсных источников на базе ускорителей, которые осуществляются в настоящее время во многих странах.

Подробное описание реактора ИБР-2 было дано в прежних публикациях, например ^{1/}. Здесь мы ограничимся лишь кратким напоминанием основных конструктивных решений.

Активная зона ИБР-2 загружена топливом из двуокиси плутония общей массой около 90 кг. Топливные стержни охлаждаются натрием с температурой на входе 300°С. Система охлаждения двухконтурная, двухпетлевая с расходом натрия через активную зону 100 м³/ч. Реактор окружен водяными замедлителями нейтронов /см.рис.1/, которые "просматриваются" 14-ю горизонтальными каналами. Два замедлителя - "гребенчатые" - имеют развитую светящуюся поверхность, форма которой позволяет

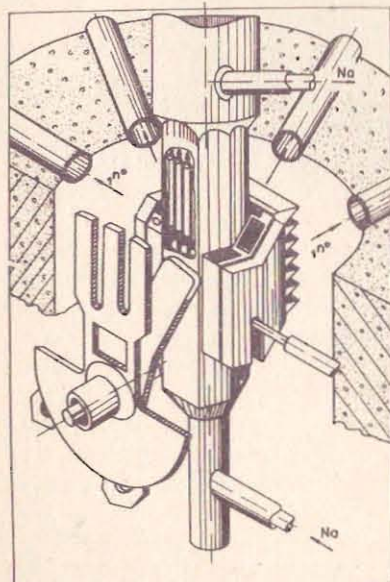


Рис.1. Принципиальная схема реактора ИБР-2.

в 2-4 раза повысить поток тепловых нейтронов утечки.

Импульс мощности формируется с помощью модулятора реактивности /МР/ - основного подвижного отражателя нейтронов /ОПО/, скорость вращения которого 1500 об./мин ^{2/}. Частота следования импульсов меняется дискретно с помощью дополнительного подвижного отражателя /ДПО/, покоящегося или вращающегося с меньшей скоростью. В последнем случае импульс развивается только в те моменты времени, когда оба отражателя оказываются вблизи активной зоны. Ниже приводятся наиболее существенные результаты, полученные по время энергетического пуска, и дается описание физических экспериментов, которые ведутся в настоящее время на пучках ИБР-2.

1. ИМПУЛЬСНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕАКТОРА

В 1982 г. реактор ИБР-2 достиг средней мощности 2 МВт при скорости подвижного отражателя 1500 об./мин и частоте следования всплеск 25 Гц, что соответствует импульсной мощности 270 МВт. Основной частотный режим реактора 5 Гц осуществлен на этом уровне средней мощности в 1984 г.; пиковая мощность достигла значения 1350 МВт /см. табл.1/.

Таблица 1

Основные характеристики реактора ИБР-2, достигнутые к настоящему времени

Параметр	Значение параметра
Средняя тепловая мощность	2 МВт
Мощность в импульсе	1350 МВт
"Полуширина" импульса мощности	230 мкс
Мощность "фона"	0,1 МВт
"Полуширина" импульса тепловых нейтронов в плоском замедлителе	240 мкс
Плотность потока тепловых нейтронов:	
- на поверхности плоского замедлителя, средняя по времени	$5 \cdot 10^{12}$ нейтр./см ² с
- то же, пиковое значение	$4 \cdot 10^{15}$ нейтр./см ² с
- на поверхности "гребенчатого" замедлителя /эффективное пиковое значение/	10^{16} нейтр./см ² с

Примечание: погрешность оценок потоков составляет 20%.

Энергетический пуск ИБР-2 проводился с модифицированным модулятором реактивности, который отличался от модулятора, описанного в работе ^{3/}, конструкцией дополнительного подвижного отражателя. Это было сделано в целях сокращения длительности импульса мощности реактора. Как известно, длительность импульса мощности реактора определяется следующим комплексом его параметров:

$$\theta = (\tau / a v^2)^{1/3},$$

1/1

где a - коэффициент параболы, описывающей изменение реактивности при движении основного подвижного отражателя /ОПО/ вблизи максимума реактивности; τ - среднее время жизни мгновенных нейтронов в реакторе; v - скорость ОПО относительно активной зоны. Во время физического пуска было выяснено, что величина a , явля-

ясь по существу характеристикой основного подвижного отражателя, заметно зависит от геометрии дополнительного подвижного отражателя.

Замена первоначального варианта ДПО /бериллиевый блок/ на стальной ДПО в виде трезубца /он показан на переднем плане рис.1/ позволила в 3 раза увеличить α . Из табл.2 видно, что с учетом сокращения τ /за счет дополнительной экранировки активной зоны от внешних замедлителей/ это дает 4-кратный выигрыш в величине отношения τ/a , что равносильно сокращению длительности вспышки в 1,6 раза, т.е. до 140 мкс вместо 220, имевшихся прежде. Однако полученный выигрыш был утрачен в связи с переходом на пониженную скорость вращения МР 1500 об./мин и в настоящее время длительность вспышки быстрых нейтронов равна 230 ± 5 мкс.

Таблица 2

Длительность импульса мощности для двух вариантов МР ИБР-2

Вариант МР	$\alpha, 10^{-4}$ град ⁻²	$\tau, \text{нс}$	$\theta, \text{мкс}$	
			$v = 1500$	$v = 3000$
ДПО - Ве /блок/	$1,00 \pm 0,02$	80 ± 10	360^*	220 ± 5
ДПО - Fe /трезубец/	$3,00 \pm 0,06$	63 ± 4	230 ± 5	140^*

* Расчетная оценка.

Более короткая вспышка мощности может быть получена при использовании модулятора реактивности в виде двух решеток, вращающихся навстречу друг другу^{/4/}. Экспериментально установлено, что такой модулятор обеспечит длительность импульса мощности около 130 мкс при скорости вращения роторов 1500 об./мин^{/5/}.

Измеренная форма импульса мощности ИБР-2 близка к гауссовой и для существующего варианта МР практически не зависит от частотного режима работы реактора. Отношение амплитуды импульса к мощности "фона", т.е. мощности, выделяемой между основными импульсами, равно $1,3 \cdot 10^4$. На рис.2 показана измеренная картина распределения мощности реактора во времени за один период следования импульсов в режиме 5 Гц. Четыре дополнительных импульса-сателлита обусловлены прохождением ОПО мимо активной зоны в моменты времени, когда ДПО не находится в непосредственной близости от реактора.

Импульс тепловых нейтронов формируется в результате замедления быстрых нейтронов в слое водяного замедлителя, окружающего активную зону реактора. Длительность импульса приблизительно

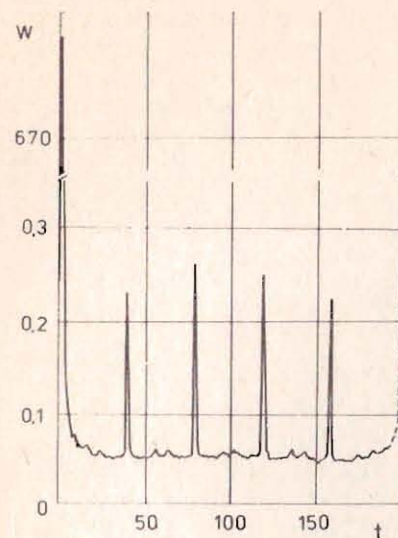


Рис.2. Распределение мощности за один период следования импульсов в режиме 5 Гц. Средняя мощность реактора - 1 МВт.

оценивается по формуле:

$$\Delta t = \sqrt{\theta^2 + \Delta t_0^2}, \quad /2/$$

где Δt_0 - длительность импульса тепловых нейтронов, возникающих от мгновенной вспышки быстрых нейтронов /при $\theta = 0$ /. Амплитуда потока тепловых нейтронов ϕ может быть определена при этом через отношение среднего по времени потока $\bar{\phi}$ к длительности импульса Δt .

Параметры ИБР-2 как источника медленных нейтронов приведены в табл.1. Здесь необходимо отметить, что данные о потоках тепловых нейтронов для ИБР-2 основываются на экспериментальном значении средней по времени плотности потока тепловых нейтронов $\bar{\phi}$ на поверхности плоского замедлителя, которое оказалось в 2 раза выше расчетного значения и равно $2,5 \cdot 10^{12}$ нейтр./см²с на 1 МВт мощности.

2. ФЛУКТУАЦИИ МОЩНОСТИ РЕАКТОРА И ДРУГИХ ПАРАМЕТРОВ

Чувствительность импульсного периодического реактора к внешним возмущениям реактивности определяется не долей запаздывающих нейтронов $\beta_{\text{эфф.}}$, как в обычном реакторе, а так называемой "импульсной долей запаздывающих нейтронов" $\beta_{\text{и}}$, которая более чем на порядок меньше $\beta_{\text{эфф.}}$. Так, для ИБР-2 величина $\beta_{\text{и}}$ равна $1,6 \cdot 10^{-4} K_{\text{эфф.}}$ в режиме 5 с^{-1} и $2 \cdot 10^{-4} K_{\text{эфф.}}$ в режиме 25 с^{-1} . Поэтому в целом вопрос о флуктуациях для импульсного реактора требует повышенного внимания.

При относительно высоких уровнях средней мощности, когда стохастическими флуктуациями можно пренебречь, основной вклад в случайные отклонения амплитуды импульсов от среднего значения вносят вибрации модулятора реактивности и флуктуации параметров теплоносителя. Флуктуации параметров других технологических систем невелики: их суммарный вклад в реактивность не превышает $2 \cdot 10^{-6} K_{\text{эфф.}}$.

Измеренные значения флуктуаций мощности ИБР-2 значительно ниже предельно допустимых. В обоих частотных режимах работы реактора, 5 и 25 Гц, относительные стандартные отклонения ампли-

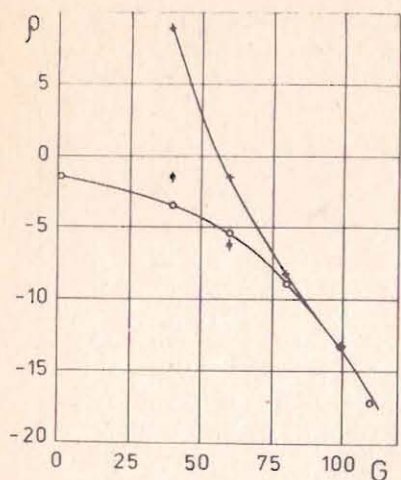
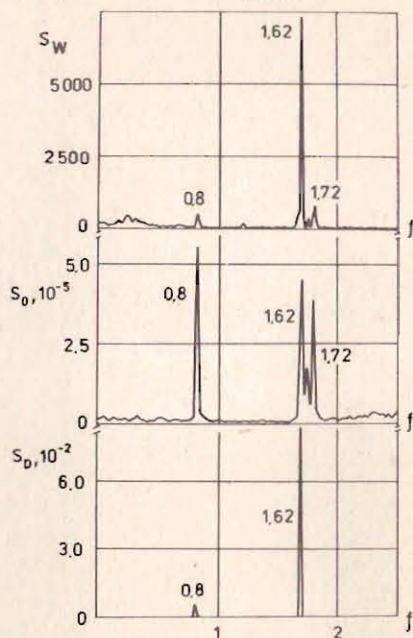


Рис.3. Зависимости реактивности ρ /доли $\beta_{\text{эфф.}}$ / от расхода натрия G ($\text{м}^3/\text{ч}$) на разных уровнях мощности W : $\circ - W = 0$, $\bullet - W = 100$ кВт, $\times - W = 1$ МВт.

Рис.4. Спектры флуктуаций амплитуды импульсов мощности S_W ($\text{кВт}^2/\text{Гц}$), поперечных колебаний ОПО S_0 ($\text{мм}^2/\text{Гц}$) и ДПО S_D ($\text{мм}^2/\text{Гц}$). f - частота в герцах, средняя мощность реактора - 1 МВт, расход натрия - $80 \text{ м}^3/\text{ч}$.



туды импульсов - около 2% при номинальном расходе теплоносителя. При уменьшении расхода уровень флуктуаций несколько снижается. С увеличением средней мощности замечен слабый рост флуктуаций вспышек, - от 1,5% при 0,5 МВт до 2% при 2 МВт.

Флуктуации расхода натрия не превышают 0,5% и сосредоточены главным образом в области низких частот /ниже 1,6 Гц/. Колебания температуры натрия на входе в реактор близки к белому шуму со стандартным отклонением, равным $0,1^\circ\text{C}$ на мощности 1 МВт, и приводят к флуктуациям реактивности на уровне $-2 \cdot 10^{-6} \text{ Кэфф.}$ Приблизительно такие же флуктуации реактивности вызываются и колебаниями расхода натрия, причем величина флуктуаций практически не зависит от уровня мощности реактора. Последнее объясняется тем, что при отклонении расхода от номинального значения $G_0 = 100 \text{ м}^3/\text{ч}$ /см. рис.3/ сумма чисто гидродинамического эффекта реактивности /он представлен нижней кривой на рис.3/ и соответствующего температурного эффекта остается постоянной на всех уровнях мощности, поскольку наклон кривых одинаков при больших расходах, т.е. при $G = G_0$ справедливо равенство

$$\frac{\partial \rho}{\partial G} + \frac{\partial \rho}{\partial T} \cdot \frac{\partial T}{\partial G} = \text{const},$$

/3/

где ρ - реактивность, T - подогрев натрия в активной зоне, а постоянная не зависит от мощности и равна $-5 \cdot 10^{-6} \text{ Кэфф.}/(\text{м}^3 \cdot \text{ч}^{-1})$. По мере увеличения мощности роль второго слагаемого в /3/ естественно возрастает, но роль гидродинамического коэффициента реактивности $\partial \rho / \partial G$ уменьшается вследствие увеличения жесткости активной зоны из-за искривления топливных кассет.

Наиболее полно изучались и продолжают изучаться уже в процессе эксплуатации реактора флуктуации, связанные с модулятором реактивности ИБР-2. На рис.4 представлен спектр мощности реактора и спектры поперечных механических колебаний основного и дополнительного подвижных отражателей, измеренные в частотном режиме 5 Гц на мощности 1 МВт в 1983 г. Все три спектра имеют ярко выраженную резонансную структуру. Резонансные пики, отмеченные на рисунке цифрами /непосредственно измеренная частота в герцах/, идентифицированы следующим образом: резонанс 0,8 Гц обусловлен вибрациями ДПО с частотой около 84 Гц, резонанс 1,62 Гц вызван более низкой собственной частотой колебаний ДПО, равной 33 Гц, и незначительными биениями с частотой 16,4 Гц в передаточных звеньях кинематической схемы МР. Под резонансный пик 1,72 Гц маскируется частота собственных колебаний лопасти ОПО, равная приблизительно 51 Гц.

Существенных изменений статистических параметров колебаний роторов МР и флуктуаций мощности реактора за время энергетического пуска обнаружено не было, хотя флюенс быстрых нейтронов на лопасти ОПО уже достиг $2 \cdot 10^{20}$ нейтр./ $\text{см}^2\text{с}$. По данным последних измерений поперечные колебания лопастей подвижных отражателей в среднем /стандартные отклонения/ составляют 0,005 мм для ОПО и 0,03 мм для ДПО. Соответствующие флуктуации реактивности должны быть равны $2,2 \cdot 10^{-6} \text{ Кэфф.}$ и $3 \cdot 10^{-6} \text{ Кэфф.}$, однако суммарный вклад ОПО и ДПО в реактивность, согласно оценке по измерениям шумов мощности, составляет $-2 \cdot 10^{-6} \text{ Кэфф.}$ Это объясняется тем, что процессы колебаний роторов ОПО и ДПО коррелированы, т.к. при встрече они смещаются в разные стороны.

В режиме 5 Гц вращаются оба подвижных отражателя, причем угол ϕ между ОПО и ДПО в момент их встречи может меняться со временем и тем самым влиять непосредственно на реактивность и длительность вспышки /1/, поскольку параметр α зависит от относительного расположения отражателей. В рабочих условиях угол ϕ флуктуирует с частотой 0,62 Гц и стандартным отклонением $-0,16^\circ$. Такие флуктуации практически не влияют на реактивность. Флуктуации длительности вспышки также малы и заключены в пределах от 0 до 3 мкс в зависимости от действительного значения среднего угла рассинхронизации, которое находится вблизи $\phi = 0$ /см. рис.5/.

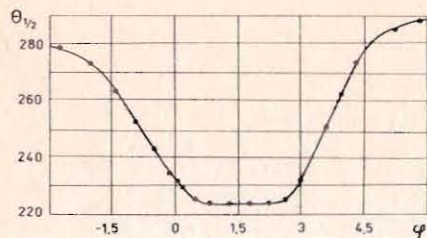


Рис.5. Зависимость длительно-сти вспьшки мощности $\theta_{1/2}$ /мкс/ от угла ϕ рассинхронизации ОПО и ДПО /град./.

3. ЭФФЕКТЫ РЕАКТИВНОСТИ И СТАБИЛЬНОСТЬ РЕАКТОРА

При изучении мощностных эффектов реактивности непосредственных измерений передаточной функции реактора не проводилось. В основном исследовались переходные процессы мощности после скачка реактивности в различных режимах работы реактора. Установлено, что при расходе натрия более $40 \text{ м}^3/\text{ч}$ реактор ИБР-2 устойчив на всех уровнях мощности. Типичный характер изменения мощности во времени после начального возмущения реактивности показан на рис.6 для малого времени наблюдения. Из рисунка хорошо видно действие быстрой и достаточно глубокой отрицательной обратной связи. При времени наблюдения порядка часов становится заметным действие очень медленной положительной обратной связи.

Быстрая составляющая мощностного коэффициента реактивности /МКР/ с постоянной времени около 10 с - отрицательна и равна приблизительно $-1,4 \cdot 10^{-3} \text{ К}_{\text{эфф.}}/\text{МВт}^{1/6}$. Эта компонента МКР, обусловленная, главным образом, расширением твэлов, приблизительно согласуется с проектными расчетами и играет основную роль в обеспечении безопасности и устойчивости реактора. Неожиданным оказалось наличие медленной положительной компоненты МКР, с постоянной времени около 90 мин , которая по абсолютной величине совпадает /в пределах ошибок измерения и обработки данных/ с отрицательной

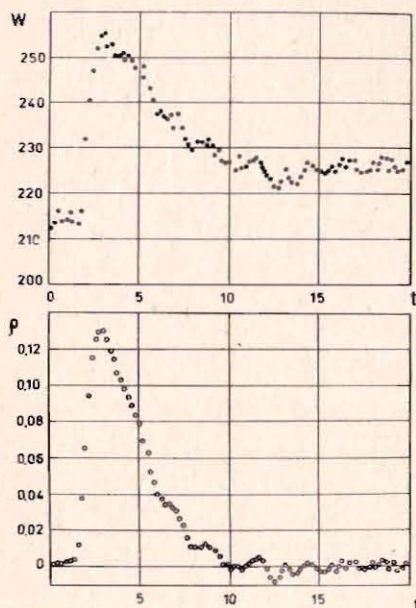


Рис.6. Переходные процессы мощности W /относит.ед./ и полной реактивности ρ /доли $\beta_{\text{и}}</math>/, вызванные введением реактивности $0,28 \beta_{\text{и}}$ за время $1,5 \text{ с}$.$

составляющей и объясняется медленными перемещениями стационарных отражателей в результате их разогрева. Кроме того, наблюдается отрицательная компонента МКР с очень большой постоянной времени /порядка суток/, представление о которой можно получить из рис.7. Природа последней составляющей, скорее всего, как-то связана с нагревом защиты реактора.

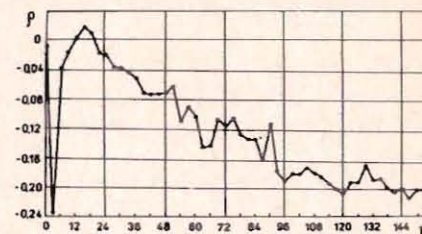


Рис.7. Изменение запаса реактивности ρ /доли $\beta_{\text{эфф.}}</math>/ во времени t /ч/ после вывода реактора на мощность 1 МВт /в момент $t = 3 \text{ ч}</math>.$$

Как уже отмечалось, при расходе теплоносителя более $40 \text{ м}^3/\text{ч}$ реактор ИБР-2 безусловно устойчив. При малых расходах возможен режим самовозбуждающихся колебаний мощности с периодом порядка 1 мин , имеющий характер автоколебаний. Однако амплитуда и частота этих колебаний зависят от уровня мощности таким образом, что их возникновение возможно лишь при низкой мощности /менее $400 \text{ кВт}</math>. В этом узком диапазоне расходов и мощностей быстрая компонента МКР "расщепляется" на две составляющие, одна из которых имеет положительный коэффициент реактивности, величина которого обратно пропорциональна расходу натрия и уровню мощности.$

Похожий характер положительной обратной связи был обнаружен ранее в реакторе БР-5 /7/, конструкция активной зоны которого являлась прототипом для ИБР-2.

В ходе пусковых экспериментов изучались и другие эффекты реактивности. Изотермический коэффициент реактивности оказался равным $-10^{-5} \text{ } \beta_{\text{эфф.}}/^\circ\text{C} / \beta_{\text{эфф.}} = 2,165 \cdot 10^{-3} \text{ К}_{\text{эфф.}}</math>. О гидродинамическом эффекте упоминалось выше. Он, как видно из рис.3, отрицателен и обусловлен перемещением топливных кассет под воздействием потока теплоносителя.$

Барометрический эффект реактивности, возникающий из-за наличия газовых пузырьков в теплоносителе, на реакторе ИБР-2 не обнаружен.

Эффект слива воды из внешних замедлителей реактора приводит, как оказалось, к увеличению реактивности. Суммарный эффект слива воды для всех замедлителей равен $1 \beta_{\text{эфф.}}</math> и объясняется попаданием в активную зону быстрых и резонансных нейтронов из тепловой и биологической защиты реактора; при наличии воды эти нейтроны замедляются и задерживаются в поглощающих экранах, отделяющих активную зону от замедлителей.$

4. РАБОТА СИСТЕМ РЕАКТОРА

К моменту написания этой статьи реактор ИБР-2 наработал 170 МВт·сут.; выгорание ядерного топлива составило ~0,2%. Такой небольшой опыт эксплуатации реактора уже позволяет, однако, говорить о надежности систем реактора. Прежде всего, необходимо отметить, что по натриевой системе охлаждения активной зоны не было отмечено ни одного случая отказа или поломки в период энергетического пуска. Главное внимание было обращено на работу системы охлаждения в аварийных условиях. По проекту предусмотрено подключение циркуляционных насосов к надежному, автономному источнику питания в случае обесточения здания; после сброса аварийной защиты в течение первых 1-2 мин осуществляется принудительное расхолаживание активной зоны с пониженным расходом, а затем - за счет естественной циркуляции натрия с расходом через активную зону от 2 до 5 м³/ч. Проверка такой схемы расхолаживания показала, что охлаждение активной зоны в любых случаях происходит удовлетворительно, и нестационарные температурные напряжения в корпусе реактора и трубопроводах в переходных режимах остаются в пределах допустимых значений.

Одна из важнейших систем ИБР-2 - подвижный отражатель - снабжен датчиками, постоянно следящими за колебаниями роторов, уровнем вибраций опор и технологическими параметрами основных узлов конструкции. Помимо штатной системы контроля проводится периодический анализ состояния подвижного отражателя статистическими методами, которые характеризуются высокой чувствительностью и большим объемом получаемой информации. За более чем двухлетний период работы реактора на мощности 1-2 МВт существенных отклонений в функционировании подвижного отражателя не наблюдалось.

СУЗ реактора функционировала надежно. Быстродействие аварийной защиты, проверенное на различных уровнях мощности, было в пределах проектных требований. Однако вследствие сложности, насыщенности этой системы имелись сбои в работе, главным образом, связанные с недостаточной помехозащищенностью /см. табл.3/. Причины отказов постепенно выявлялись и устранялись.

Радиационная обстановка как в самом здании реактора, так и на окружающей местности удовлетворяет нормативным требованиям радиационной безопасности с большим запасом по уровню мощности.

5. ФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НА ПУЧКАХ

В период энергетического пуска на реакторе ИБР-2 помимо пусковых экспериментов параллельно велись работы по освоению нейтронных пучков: изучение их характеристик, создание установок, совершенствование дозконтроля на пучках, научные исследования на уже готовых установках /см. табл.4/.

Физические установки расположены в двух экспериментальных залах площадью 30x60 м². Для выполнения научной программы на

пучках реактора ИБР-2 установлен ряд спектрометров упругого и неупругого рассеяния нейтронов. В настоящее время из 14 горизонтальных пучков ИБР-2 на 8 пучках /9 установок/ ведутся исследования по физике элементарных частиц, конденсированных сред и радиобиологии; 4 пучка находятся в стадии освоения /получены выведенные пучки, ведутся наладочные работы/. В дальнейшем 4 пучка планируется вывести за пределы экспериментального зала с целью получения пролетных баз более 30 м.

Подробные характеристики созданных спектрометров приведены в ряде публикаций ^{8,9/}. Определенное представление об экспериментальных условиях на реакторе ИБР-2 и стационарном реакторе можно получить, сравнив средние потоки нейтронов на исследуемом образце. Сопоставление этих потоков проведено в табл.5 /данные для спектрометров на высокопоточном реакторе HFR-ILL взяты из ^{10/}/. Из таблицы видно, что, несмотря на 30-кратное отличие средних мощностей, мы имеем вполне сопоставимые средние потоки монохроматизированных нейтронов на месте образца; при этом следует иметь в виду, что установки на ИБР-2 еще не полностью оптимизированы. "Секрет", поясняющий происхождение такого кажущегося несоответствия, очень прост: в обеих сравнимых ситуациях к пучкам предъявляются примерно одни и те же требования как по угловой расходимости, так и по степени монохроматизации. Однако на стационарном реакторе монохроматизация производится путем извлечения из "белого" пучка нейтронов заданной длины волны, а остальные нейтроны при этом не используются. На импульсном реакторе монохроматизация происходит по времени пролета, без каких-либо потерь, и все или почти все нейтроны в пучке оказываются полезными.

В настоящий момент на разных стадиях исследования находятся следующие объекты:

а/ по физике аморфных систем: структурные исследования стекловидных металлов, исследования фазовых переходов в переохлажденных /стекловидных/ жидких кристаллах;

б/ в области молекулярной биологии и структуры растворов: исследования структуры рибосом, исследования ориентации пурпурных мембран в электрическом поле, исследования гидратации мембран, исследования эффектов сокращения в иммуноглобулинах I_gG, исследования структуры гидратационной оболочки полимеров в водных растворах, исследования структуры растворов сильных электролитов;

в/ в области неупругого рассеяния: исследования динамики водорода в никеле, исследования динамики адсорбированных газов на поверхностях цеолитов, исследования электронной структуры редкоземельных сплавов;

г/ в области прикладных исследований: исследование эффектов биологического воздействия импульсного режима облучения, проведение элементного анализа экологических и геологических образцов.

Таблица 3

Количество непредвиденных срабатываний аварийной защиты на реакторе ИБР-2 и их причины

Причины	Годы			
	1981	1982	1983	1984*
1. СУЗ:				
Отказы в электронной аппаратуре	1	1	1	-
Отказы КИП	-	5	-	-
Наводки в электронной аппаратуре	-	13	17	2
2. Неисправности в электрических схемах	-	3	3	-
3. Нарушения электро-снабжения	-	5	6	-
4. Ошибки персонала	-	3	2	-
5. Причина неоднозначна	-	2	-	-
Средняя продолжительность работы реактора между срабатываниями АЗ в часах	16	42	83	380

* На 1 марта 1984 г.

Таблица 4

Работа реактора ИБР-2 за период энергетического пуска

Год	Время работы на мощности, в ч			
	Всего на мощности	В режиме 5 Гц	В режиме 25 Гц	На физический эксперимент
1981	132	34	98	-
1982	1554	755	799	608
1983	2588	2564	24	2315
1984*	771	771	-	743
В СУММЕ:	5045	4124	921	3666

* До 1 марта 1984 г.

Таблица 5

Сопоставление средних потоков тепловых нейтронов на образце для реакторов ИБР-2 и HFR-III

Реактор	ИБР-2, $W = 2$ МВт	HFR, $W = 56$ МВт
Тип спектрометра	$\bar{\Phi}, \text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$	$\bar{\Phi}, \text{см}^{-2}\text{г}^{-1}$
<u>Дифрактометры:</u>		
ДН-2, ДН-3	$2 \cdot 10^7$	$5 \cdot 10^7$
НСВР	$4 \cdot 10^6$	$(6-8) \cdot 10^6$
<u>Малогоугольного рассеяния:</u>		
МУР	$3 \cdot 10^7 \cdot 4 \cdot 10^6$	$5 \cdot 10^6 + 5 \cdot 10^5$
<u>Неупругого рассеяния:</u>		
КОРА	$3 \cdot 10^7$	$(8+1,5) \cdot 10^7$
КИСОГ	$1 \cdot 10^7$	$(2+1) \cdot 10^7$
		ИН2, ИН4, ИН5 и др. $10^4 + 10^6$

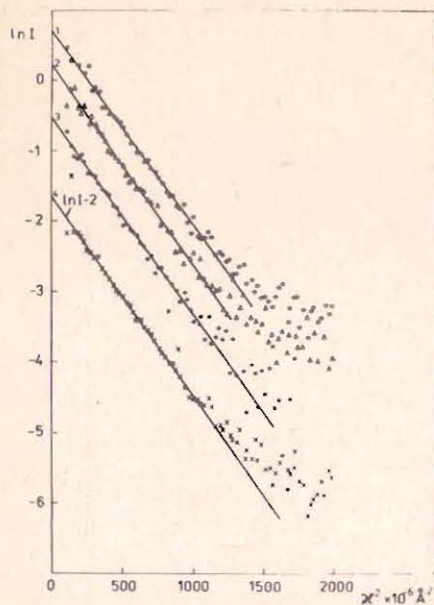


Рис.8. Интенсивность малоуглового диффузного рассеяния от квадрата переданного импульса для раствора 70S рибосом бактерий *E.coli*, выращенных на дейтерированной среде, уравнивающей плотности когерентных амплитуд рассеяния белковой и рибонуклеиновой компонент. Объем образца 0,6 мл, концентрация рибосом $2,4 \pm 4,8$ мг/мл. Время измерений - 6 ч. Цифрами обозначены кривые, полученные при вариации изотопного состава растворителя: 1 - 100% H_2O ; 2 - 20% D_2O ; 3 - 60% D_2O ; 4 - 40% D_2O . Сплошные линии - гинье-аппроксимация с радиусом инерции $94,1 \pm 1,0$; $95,3 \pm 0,9$; $94,7 \pm 1,2$; $95,2 \pm 1,0$ Å. Постоянство радиуса инерции доказывает нейтронно-оптическую однородность исследуемых рибосом. Работа выполнена совместно с Институтом белка АН СССР.

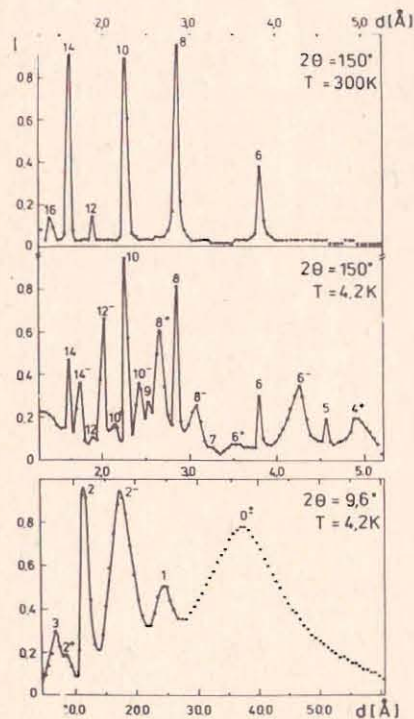
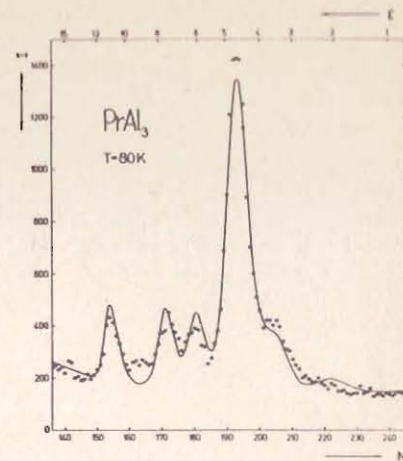


Рис.9. Дифракционный спектр от плоскостей $(00l)$ монокристалла $BaCo_2Ti_2Fe_8O_{19}$ /гексаферрит типа M/ при комнатной и гелиевой температурах. При температуре 4,2 К наряду с ядерными рефлексами наблюдаются магнитные сателлиты, указывающие на спиральный характер магнитной структуры феррита с периодом спирали ~ 40 Å. Размер образца - 4 мм^3 , продолжительность измерений - 1 ч. Цифрами обозначены порядки ядерных отражений, знаки +, - относятся к соответствующим магнитным сателлитам. Работа выполнена совместно с Институтом физики высоких давлений АН СССР.

Рис.10. Спектр неупругого парамагнитного рассеяния от интерметаллического соединения $PrAl_3$, измеренный при температуре 80 К. ϵ - переданная энергия в мэВ, N - номер канала временного анализатора, шириной 128 мкс. Сплошная линия - свертка сечения рассеяния на переходах между уровнями кристаллического электрического поля /КЭП/ с функцией разрешения спектрометра, полученная для набора параметров гамильтониана КЭП, наилучшим образом описывающих экспериментальные точки. Образец - поликристалл, вес - 200 г. Время измерений - 4 ч. Работа выполнена совместно с Институтом металлургии им.Байкова АН СССР и Университетом г.Лейпцига, ГДР.



На рис.8-10 приведены примеры экспериментальных результатов, полученных на различных спектрометрах реактора ИБР-2. Особо можно отметить, что высокая интенсивность нейтронных пучков позволяет использовать в экспериментах по упругому рассеянию нейтронов /рис.8,9/ миллиграммовые количества образцов.

Как видно из приведенных примеров, исследования на реакторе ИБР-2 развернулись уже достаточно широко. Дальнейшее освоение возможностей импульсного реактора позволит приступить к работе над качественными новыми экспериментами, использующими в большой мере специфику импульсного реактора - большую мгновенную плотность нейтронов. К числу таких экспериментов относятся исследования кинетики фазовых переходов в экстремально высоких магнитных полях, реализуемых с помощью импульсных магнитов, исследования свойств неравновесных возбуждений в твердых телах, исследования быстро протекающих процессов в биологических объектах /сокращение мышц, транспорт ионов в мембранах под воздействием световых или электрических стимуляторов/. Эти направления почти недоступны для обычных исследовательских реакторов и должны открывать новые области применения нейтронов в научных исследованиях. Иллюстрацией таких новых применений импульсного источника могут служить выполненные на ИБР-2 эксперименты по поиску аксиона 11 - новой нейтральной частицы, предсказываемой в некоторых вариантах теории электрослабого взаимодействия. Аксионы могли бы рождаться при захвате нейтронов водородом или бором в защите реактора, проходить через защиту практически без поглощения и регистрироваться по характерному распаду на два гамма-кванта. Импульсный режим работы реактора позволяет эффективно выделять такие распады из равномерного по времени фона космического излучения.

Эксперименты, выполненные на ИБР-2, оказались в несколько раз чувствительнее аналогичных экспериментов по поиску аксиона на мощных энергетических реакторах и практически опровергли "стандартную" модель аксиона.

В заключение авторы статьи хотели бы отметить исключительно важную роль, которую сыграл Д.И.Блохинцев, безвременно ушедший от нас накануне энергетического пуска ИБР-2, в деле создания этого реактора. Много творческой инициативы, энергии, труда вложили в энергетический пуск реактора сотрудники Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ и ряда предприятий Советского Союза. Авторы статьи выражают признательность ведущим экспериментаторам, предоставившим материалы первых исследований на пучках ИБР-2.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ананьев В.Д. и др. ПТЭ, 1977, №5, с.17.
2. Ананьев В.Д. и др. АЭ, 1971, т.31, вып.4, с.352.
3. Ананьев В.Д. и др. АЭ, 1979, т.46, вып.6, с.393.
4. Ломидзе В.Л., Нго Куанг Зуй, Шабалин Е.П. АЭ, 1982, т.52, вып.5, с.320.
5. Ананьев В.Д. и др. Atomkernenergie, Kerntechnik, 1983, vol.43, No.4, p.253.
6. Пепельшев Ю.Н., Попов А.К., Рогов А.Д. ОИЯИ, P13-83-471, Дубна, 1983.
7. Краснояров Н.В., Никольский Р.В., Ефимов И.А. АЭ, 1965, т.18, вып.5, с.474.
8. IV школа по нейтронной физике. Дубна, 8-18 июня 1982 г. Сб. лекций. ОИЯИ, ДЗ, 4-82-704, Дубна, 1982, с.277-291.
9. Luschikov V.I. et al. JINR, E3-12740, Dubna, 1979.
10. Neutron Beam Facilities Available for Users. Inst. Laue-Langevin, 1981.
11. Ананьев В.Д. и др. ОИЯИ, P1-83-709, Дубна, 1983.

Рукопись поступила в издательский отдел
27 июля 1984 года.

Ананьев В.Д. и др.

P13-84-538

Энергетический пуск реактора ИБР-2

и первые физические исследования на его пучках

Сообщается об основных результатах пусковых испытаний импульсного периодического реактора ИБР-2, проведенных на уровнях средней мощности до 2 МВт, на которой он в настоящее время принят в эксплуатацию. Приводятся данные о важнейших эксплуатационных характеристиках и параметрах реактора как импульсного источника нейтронов. Обсуждаются результаты первых физических экспериментов на выведенных пучках ИБР-2.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1984

Перевод авторов

Ananyev V.D. et al.

P13-84-538

IBR-2 Reactor Start-Up and the First Neutron
Beam Investigations

The main experimental start-up characteristics of the repetitively pulsed fast reactor IBR-2 obtained for the mean power interval up to 2 MWt are discussed. The first scientific researches on extracted neutron beams are briefly described.

The investigation has been performed at the Laboratory of Neutron Physics, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research, Dubna 1984